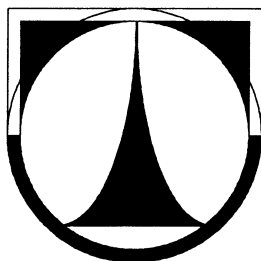


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

Katedra vozidel a motorů



**KONSTRUKCE TLUMICÍ JEDNOTKY
S MAGNETOREOLOGICKOU KAPALINOU**

**ENGINEERING DESIGN OF MAGNETORHEOLOGICAL
SHOCK ABSORBER**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Jan Kučera

Květen 2007

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

Katedra vozidel a motorů

Obor 23 – 17 – 8

Konstrukce strojů a zařízení

Zaměření

KOLOVÉ DOPRAVNÍ A MANIPULAČNÍ STROJE

KONSTRUKCE TLUMICÍ JEDNOTKY S MAGNETOREOLOGICKOU KAPALINOU

ENGINEERING DESIGN OF MAGNETORHEOLOGICAL SHOCK ABSORBER

KSD – DP – 533

Jan Kučera

Vedoucí diplomové práce: doc. Dr. Ing. Pavel Němeček

Konzultant diplomové práce: Ing. Pavel Matura

Počet stran : 51

Počet obrázků: 43

Počet příloh: 0

Počet výkresů : 5

Květen 2007

Místo pro vložení originálního zadání DP (BP)

KONSTRUKCE TLUMICÍ JEDNOTKY S MAGNETOREOLOGICKOU KAPALINOU

Anotace

Tato práce se zabývá konstrukčním návrhem tlumicí jednotky s magnetoreologickou kapalinou, která je součástí podvozků osobních automobilů. Je zde uveden současný stav používání aktivních podvozků v automobilovém průmyslu a možnosti zkvalitnění jejich vlastností u osobních automobilů.

Práce poskytuje obecný popis konstrukce magnetoreologického tlumiče včetně vlastností magnetoreologické kapaliny. Dále je zde proveden vlastní konstrukční návrh tlumiče s využitím výpočtů magnetického pole navrhované cívky. Je zde uveden způsob měření základních charakteristik tlumiče včetně experimentálního měření pro ověření magnetických vlastností použitých materiálů. V závěru práce je popsán návrh dalšího postupu při vývoji tohoto produktu.

Klíčová slova:

aktivní podvozek
magnetoreologická kapalina
tlumič pérování
cívka
píst
konstrukční návrh

ENGINEERING DESIGN OF MAGNETORHEOLOGICAL SHOCK ABSORBER

Annotation

This thesis deals with the engineering design of Magnetorheological Shock Absorber which is a part of passenger car chassis. It contains a current state of use of active chassis in the car industry and some possibilities of improvement of their characteristics.

The thesis provides a general description of the Magnetorheological Shock Absorber including characteristics of Magnetorheological fluid. The engineering design of the Shock Absorber including the calculation of Magnetic field of designed induction coil is produced here. It contains the method of measurement of the basic characteristics of Shock Absorber including the experimental measurement carried out for verification of magnetic characteristics of used materials.

The conclusion describes a proposal for a further procedure in the development of this product.

Key words:

Active chassis
Shock absorber
Magnetorheological fluid
Coil
Piston
Engineering design

Prohlášení k využívání výsledků diplomové práce

Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom(a) povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

V Liberci dne 24.května 2007

.....

podpis

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat mým rodičům a přátelům za podporu během celého studia. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Maturovi za odbornou pomoc při vypracování této práce.

OBSAH

1	Úvod.....	10
2	Současný stav používání aktivních podvozků.....	11
2.1	Definice aktivního podvozku	11
2.2	Odpružení	11
2.3	Tlumič	12
2.4	Komfort a bezpečí	13
2.5	Aktivní podvozky	13
2.5.1	Podvozek s pomalou odezvou	14
2.5.1.1	Pneumatické pružící jednotka	14
2.5.1.2	Hydropneumatická pružící jednotka	16
2.5.2	Podvozek se středně rychlou dobou odezvy	17
2.5.3	Podvozek s rychlou odezvou.....	18
3	Možnosti zkvalitnění vlastností aktivních podvozků osobních automobilů.....	19
3.1	Active Body Control (ABC)	19
3.2	Bose suspension	21
3.3	Upravené konvenční tlumiče.....	22
3.3.1	Elektronicky řízené tlumiče CDC (Continuous Damping Control).....	22
3.3.2	Reologické tlumiče.....	25
4	Vlastnosti magnetoreologické kapaliny	27
4.1	ER a MR Kapaliny	27
4.1.1	MR kapalina	28
4.2	Použití magnetoreologické kapaliny v tlumiči.....	31
4.2.1	Jednoplášťový tlumič	31
4.2.2	Dvoupplášťový tlumič.....	32
5	Základní konstrukční díly magnetoreologického tlumiče.....	33
5.1	Uzávěr tlumiče	33
5.2	Doraz tlumiče	34
5.3	Sací ventil.....	34
5.4	Gumokovová podložka na tlumení chvění.....	35

6	Návrh cívky	36
6.1	Zapojení cívek	36
6.2	Předběžný výpočet cívky	37
7	Návrh pístu	38
7.1	Tělo pístu	38
7.1.1	Píst s cívkou vně	38
7.1.2	Píst s vloženou cívkou	39
7.2	Víko	41
7.3	Jádro	42
7.4	Zjednodušený výpočet tlumiče	43
8	Měření	44
8.1	Charakteristiky tlumičů	44
8.2	Vlastní měření	45
9	Závěr	50
	Použitá literatura	51

Seznam použitých symbolů a označení

ABC	Aktive Body Control
ABS	Antiblock Braking System
CAN	Controller Area Network
CDC	Continous Damping Control
CDCe	Continous Damping Control external vavlye
CDCi	Continous Damping Control internal vavlye
ESP	Eletronic Stability Program
ER	Elektroreologický
MR	Magnetoreologický

U	[V]	napětí zdroje
I	[A]	ovládací proud
P	[W]	příkon cívky
U_m	[A]	magnetické napětí cívky
R	[Ω]	odpor cívky
ρ	[$\Omega.m$]	měrný odpor vodiče
N	[-]	počet závitů
l_z	[m]	stření průměrová délka závitu
S_d	[m ²]	průřez vodiče
μ_0	[H/m]	permeabilita vakua
μ_r	[-]	permeabilita prostředí
F	[N]	tlumící síla
Q	[m ³ /s]	objemový průtok
Δp	[Pa]	tlakový spád na pístu
D_p	[m]	průměr pracovního válce
D_r	[m]	průměr pístnice

1 Úvod

Tlumicí jednotka s magnetoreologickou (MR) kapalinou je jednou z možností jak zkvalitnit vlastnosti aktivních podvozků u osobních automobilů. Řada světových výrobců tlumících jednotek hledá nové způsoby jak prostřednictvím aktivních podvozků dosáhnout vyššího cestovních komfortu, větší bezpečnosti a vyšší životnosti u osobních automobilů. Ve vztahu k možnostem, které poskytují nové technologie, však významným hlediskem zůstává poměr mezi spolehlivostí a cenou těchto systémů.

Cílem této práce je konstrukční návrh funkčního vzorku tlumicí jednotky s MR kapalinou, který by měl splňovat parametry pro možné zařazení do sériové výroby.

Úvodní část práce podává základní přehled současného stavu používání aktivních podvozků a uvádí možnosti jejich zkvalitnění u osobních automobilů. Dále je zde uveden obecný popis konstrukce MR tlumiče jako východiska pro konkrétní konstrukční návrh.

Můj vlastní konstrukční návrh MR tlumiče vychází z tlumiče typové řady 27 výrobního programu firmy BRANO. Konstrukční část se týká optimálního navržení pístu, pístnice a cívky. Popis konstrukčního řešení je doplněn technickými výkresy.

Konstrukční řešení, které je zde navrženo, by mělo posloužit pro získání potřebných poznatků o chování tlumiče. Z tohoto důvodu je v práci zařazena i kapitola týkající se charakteristiky tlumičů a způsob jejich měření.

Vzhledem k tomu, že v době odevzdání diplomové práce byl tlumič teprve ve výrobě, nebylo možné provést navržená měření a ověřit správnost výpočtu. Proto bylo použito náhradní řešení spočívající ve využití pro měření staršího tlumiče ,což posloužilo dostatečně k ověření magnetických vlastností použitých materiálů.

V závěru práce je popsán návrh dalšího postupu při vývoji této tlumicí jednotky.

2 Současný stav používání aktivních podvozků

2.1 Definice aktivního podvozku

Intelligentním podvozkem se v automobilové terminologii označuje aktivní podvozek. Je to adaptabilní systém odpružení vozu, který se přizpůsobuje zatížení vozu a zajišťuje ideální jízdní podmínky i při plném zatížení. Za aktivní podvozek je považován ten podvozek automobilu, který má elektronicky řízené systémy odpružení náprav a tlumení jejich kmitů. V principu se jedná o regulaci charakteristik odpružení a tlumení u jednotlivých náprav pomocí řídicího systému na optimální podmínky pro daný jízdní stav. S aktivním podvozkem tak lze dosáhnout vyššího cestovního komfortu, vyšší bezpečnosti, menšího provozního namáhání dílů podvozku a tím i vyšší životnosti.

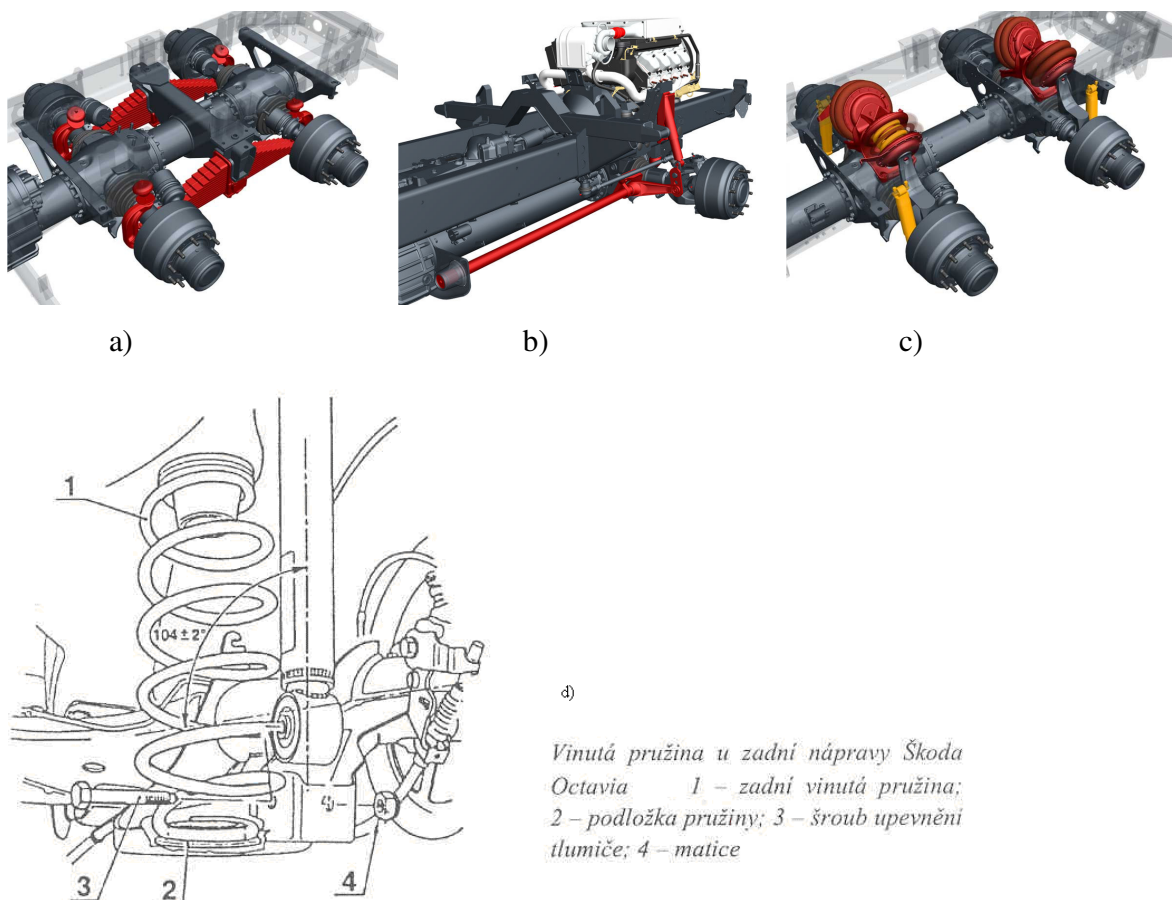
Dalšími komponenty, které ovlivňují jízdní vlastnosti, jsou pasivní prvky jako je závěs kola, systém řízení, brzdová soustava, stabilizátory, pneumatiky, karoserie, poloha těžiště atd. Pokud nejsou tyto pasivní prvky správně implementovány do systému podvozku, odpružení a tlumení ztrácí na efektivitě.

2.2 Odpružení

Je řešeno (obr. 1):

- pomocí jednoduchých nebo skládaných listových per,
- vinutými pružinami,
- zkrutnými pružinami,
- vzduchovými pružinami.

Odpružení zmenšuje přenos kmitavých pohybů nápravy na karoserii a chrání tak posádku i náklad před nežádoucími otřesy. Při přejezdu nerovnosti se odpružení z energetického hlediska chová jako akumulátor energie. Aby nedošlo ke kmitání kola, je nutné tuto energii zmařit. K tomu slouží tlumič.



Obr.1 Typy odpružení

a) listová péra b) torzní tyč c) vzduchová pružina d) vinutá pružina

2.3 Tlumič

Úkolem tlumiče (obr. 2) je tlumení kmitů odpružené i neodpružené hmoty vozidla. Automobily jsou vzhledem k požadavku jízdního komfortu poměrně měkce odpruženy a při rázovém zatížení by tedy pružící element potřeboval velmi dlouhou deformační dráhu, aby došlo k akumulaci této deformační energie. Pokud je do systému zařazen tlumič, místo akumulace je tato energie tlumičem transformována na teplo.

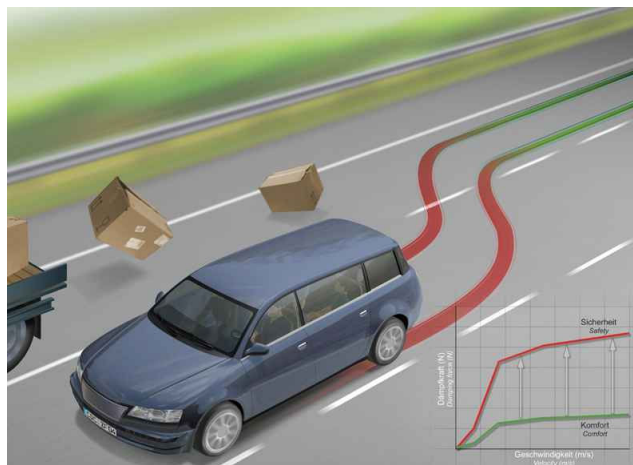


Obr.2 Tlumič

Konstrukce podvozku je tímto odlehčena od nežádoucího silového působení a výrazně zvyšuje pohodlí posádky. Na dobrém technickém stavu tlumiče je přímo závislá bezpečnost silničního provozu.

2.4 Komfort a bezpečí

Hlavním problémem u neaktivních podvozků bylo nalezení kompromisu mezi komfortem a bezpečím jízdy (obr. 3). Bezpečí jízdy se hodnotí veličinou, kterou je přilnavost kola k vozovce. Jedná se o poměr minimálního zatížení vozovky pneumatikou automobilu při překonávání nerovnosti a statického zatížení. Minimální hodnota je 0% a znamená, že se kolo nedotýká vozovky. Naopak 100% je nedosažitelná hodnota a znamená dokonalou přilnavost. Lze říci, že komfort a bezpečí jízdy jsou dvě navzájem se popírající vlastnosti. Proto u neaktivních podvozků dochází ke kompromisu nebo složitým konstrukčním úpravám. Obecně platí, pokud je auto nastaveno jako tvrdší, je zlepšena jízdní stabilita, řiditelnost, ovladatelnost.



Obr.3 Komfort vs. bezpečí

2.5 Aktivní podvozky

Požadavky na aktivní podvozek lze z hlediska technické náročnosti a požadavků na rychlost odezvy rozdělit na:

- podvozek s pomalou odezvou
- podvozek se středně rychlou odezvou (doba reakce do 10ms)
- podvozek s rychlou odezvou

2.5.1 Podvozek s pomalou odezvou

V dnešní době se u osobních automobilů používají převážně podvozky s pomalou dobou odezvy. Tyto podvozky umožňují snadnou změnu světlé výšky nebo změnu tuhosti závěsu dle požadovaného stylu jízdy (sport vs. komfort). Tyto typy podvozků nereagují na požadavky kladené na aktivní tlumiče za jízdy (náklon v zatáčkách, při brzdění a rozjezdech atd.).

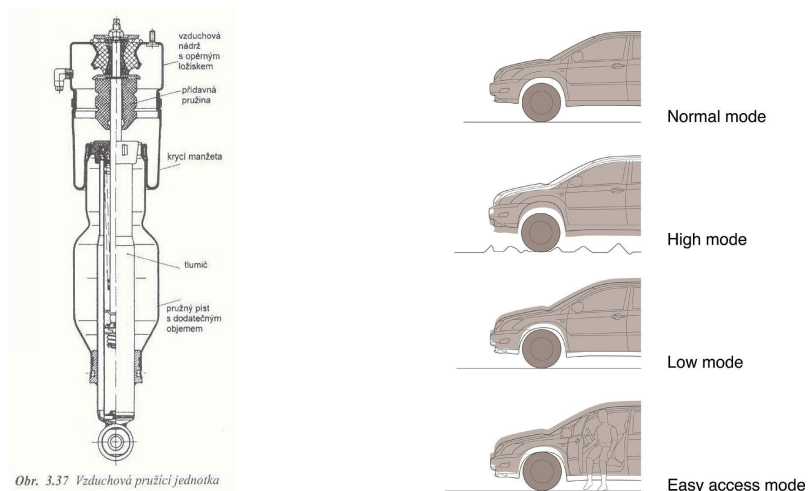
Změnu tuhosti závěsu lze u klasických tlumičů a pružin provést několika způsoby. Utažením, povolením pružiny nebo zvýšením tlaku v plynové komoře. Nastavení je ovládáno pomocí servomotorků, řízených řídicí jednotkou, která jako vstupní dat používá signály ze snímačů zatížení kola, popř. snímačů polohy kola, zrychlení jeho pohybu v kolmém směru.

Jednodušší systémy jsou závislé na zásahu řidiče, který vybírá nastavení podvozku tlačítkem (sport, komfort popř. kompromis). Složitější systém ještě navíc sleduje užitečné zatížení vozu.

Jedná se o pneumatické nebo hydropneumatické pružící jednotky.

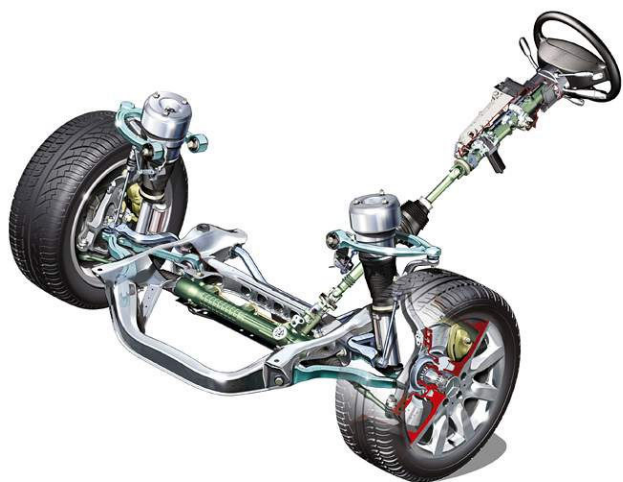
2.5.1.1 Pneumatické pružící jednotka

Pneumatické pružící jednotky jsou často řešeny jako kombinace plynokapalinových tlumičů a vzduchových pružin (obr. 4,5). Jednotky jsou obvykle automaticky regulovány nahuštěním vzduchových komor bez zásahu řidiče za všech provozních podmínek. Regulace zajišťuje korekci výšky vozidla na základě snímání zatížení vozu. Ve většině případů může řidič měnit světlou výšku vozidla manuálně. Některé systémy kromě toho automaticky mění světlou výšku v závislosti na rychlosti. Při vyšších rychlostech ji skokově snižují a zvyšuje se tak přítlak vozidla k vozovce.



Obr. 3.37 Vzduchová pružící jednotka

Obr.4 Řez vzduchovou pružící jednotkou, příklad regulace výšky vozu



a)



b)

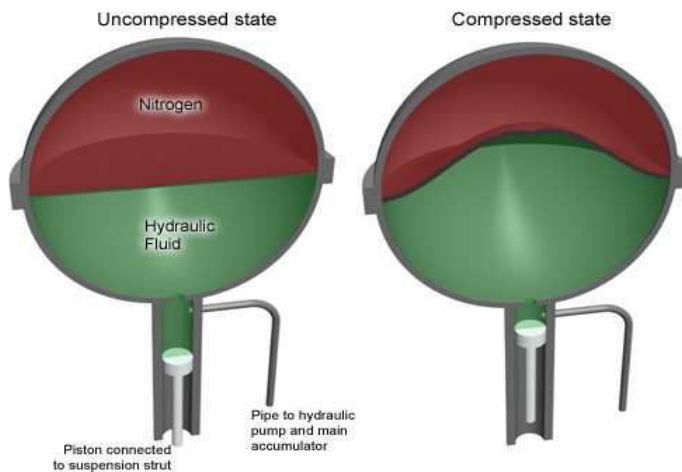


c)

Obr.5 Pneumatické pružení Air Matic Mercedes-Benz
a) přední náprava b) zadní náprava c) řez tlumičem

2.5.1.2 Hydropneumatická pružicí jednotka

Pracuje na rozdíl od pneumatické s konstantní hmotností pružícího plynu. Jako plynové náplně se nejčastěji používá dusík. Základní částí je válec, ve kterém se pohybuje píst spojený pákovým převodem s ramenem zavěšeného kola. S horní částí válce je spojena tlaková nádoba kulového



Obr.6 Řez tlakovou nádobou

tvaru, kterou rozděluje pryžová membrána na dvě části. V horní polokouli (obr. 6) je stlačený plyn, prostor mezi membránou a pístem je vyplněn kapalinou. Mezi válcem a spodní polokoulí tlakové nádoby jsou umístěny redukční ventily, které zajišťují škrcení kapaliny při pohybu pístu, tím je zajištěn tlumící účinek.

Rozdílné zatížení vozidla je kompenzováno přívodem kapaliny ze zásobníku do pracovního prostoru válce, čímž je zajištěna regulace světlé výšky. O přívod kapaliny se stará velký hydraulický generátor, který je poháněn řemenem z klikové hřídele motoru. Nevýhodou tohoto systému je celková hmotnost a snížení výkonu motoru.



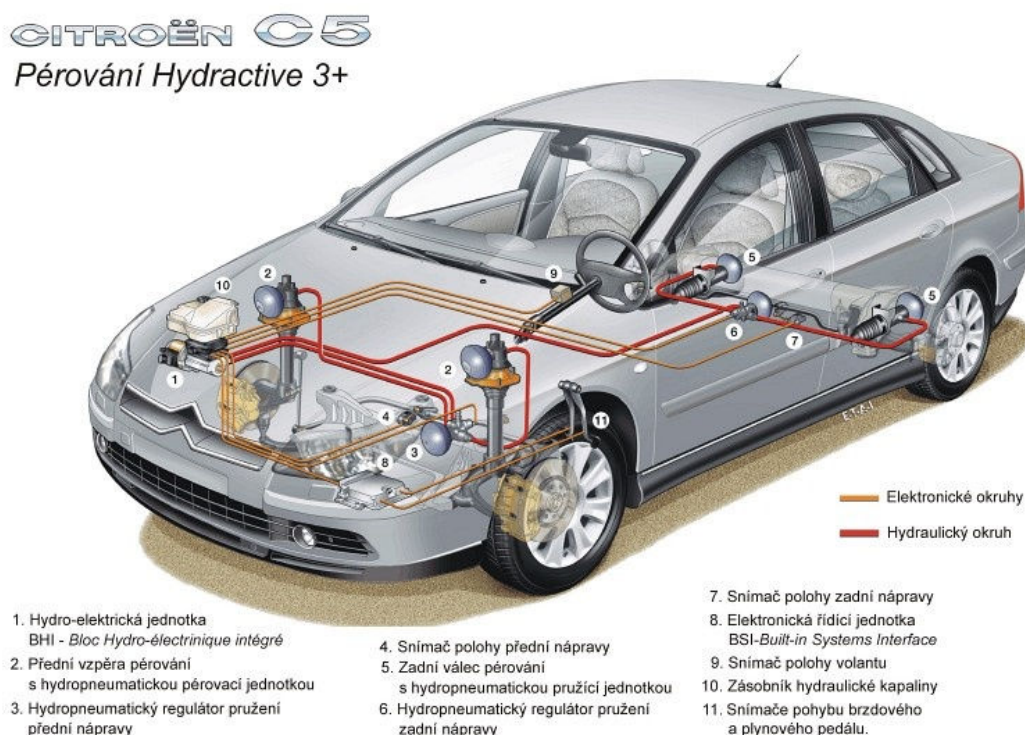
Obr.7 Změna světlé výšky Citroen Xantia

a) parkovací poloha b) servisní poloha c) tlaková nádoba

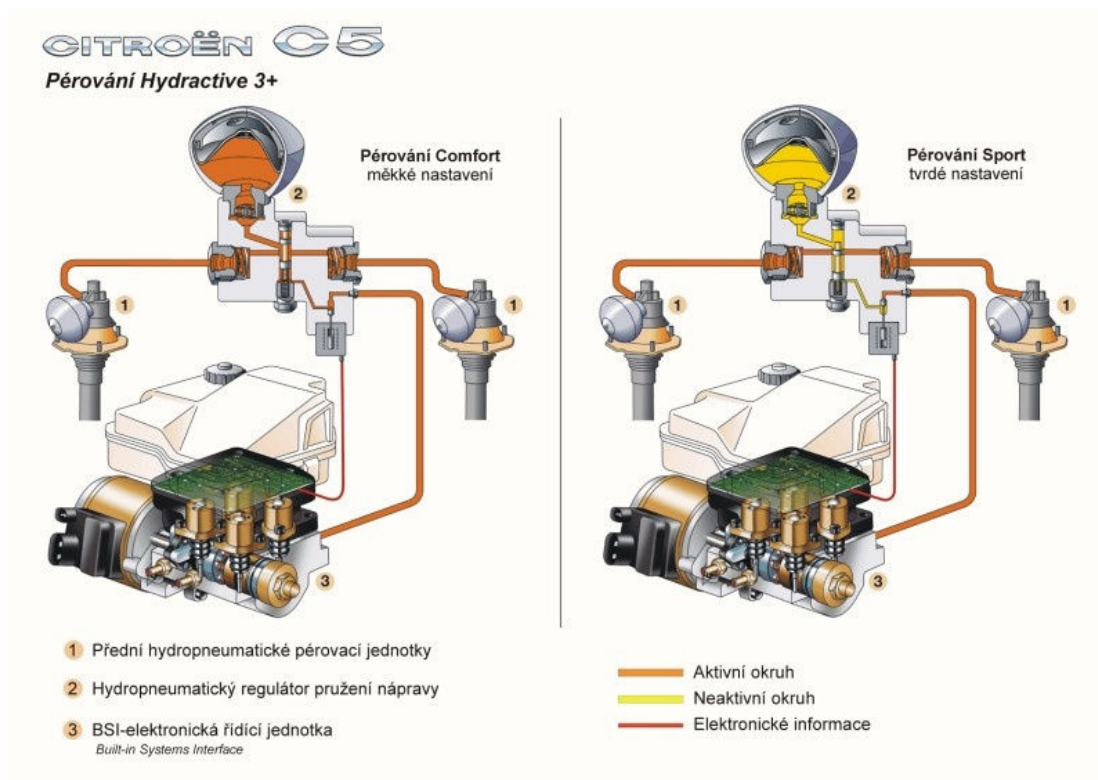
2.5.2 Podvozek se středně rychlou dobou odezvy

V současné době je tento typ podvozku nejlepším, co nabízí automobilový trh sériově vyráběných vozidel. Vychází z podvozků s pomalou odezvou. Pneumatický kompresor, hydraulický generátor nebo servomotorky jsou výkonnější a jsou tak schopny měnit tvrdost tlumení mnohem rychleji (obr. 8,9). Toho se využívá pro regulaci nevhodných náklonů. Rychlost odezvy se pohybuje v řádu desetin sekund. To má kladný vliv na kvalitu tlumení a tím i na komfort a bezpečí jízdy.

Nicméně tyto systémy stále neumožňují přizpůsobovat tlumicí sílu nerovnostem vozovky. Frekvence odezvy musí být minimálně 6-krát vyšší než je frekvence chodu tlumiče během překonávání nerovnosti. Systém totiž musí několikrát reagovat změnou tuhosti tlumení v rámci jedné periody zdvihu tlumiče.



Obr.8 Schéma zapojení hydropneumatického podvozku poslední generace Citroen



obr.9 Hydraulický obvod systému Hydroactive3+

2.5.3 Podvozek s rychlou odezvou

Tyto podvozky se používají výhradně v autosportu. Jsou velice drahé a konstrukčně náročné. Z hlediska funkce jsou schopny odezvy i při velice rychlých rázech. To je velice důležité pro chování vozu např. u formule 1. Tyto tlumicí systémy jsou hydraulické a pracují na principu rozdílných tlaků v horní a spodní komoře tlumiče ovšem při vysokých tlacích, aby byla zaručená rychlá odezva.

3 Možnosti zkvalitnění vlastností aktivních podvozků osobních automobilů

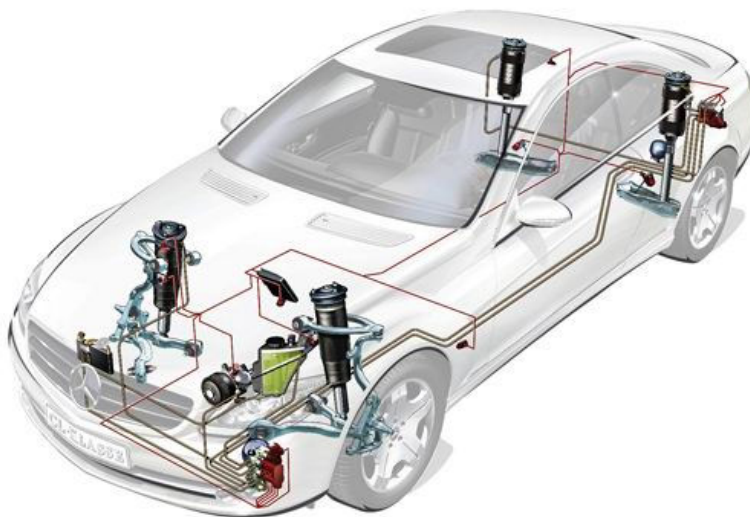
Zkvalitnění vlastností aktivních podvozků se hlavně týká podvozků se středně rychlou dobou odezvy. Je několik komerčních typů řešení. U některých systémů je technická a elektronická komplikovanost obrovská a tím se výrazně snižuje spolehlivost a zvyšuje cena.

3.1 Active Body Control (ABC)

V roce 1999 měl světovou premiéru systém Active Body Control (ABC) firmy Mercedes Benz (obr. 10,11). Tento systém zvládá vše výše zmíněné (změna světlé výšky v závislosti na zatížení a rychlosti, snížení vychýlení do stran při výhybných manévrech, snížení kolísání karosérie při slalomovém testu, brzdění a rozjíždění, nastavení charakteristiky podvozků na Sport a Komfort). Tento systém ale umí více. Regulační rozsah ABC se omezuje na pohyby karosérie do maximálně 5Hz (tzn. rychlost odezvy tlumení okolo 25 ms). Jde o vibrace, ke kterým obvykle dochází v důsledku nerovnosti povrchu dálnice, při brzdění neb v zatáčkách.

Co se týče vysoko-frekvenčních vibrací kol, v tomto případě používá Mercedes-Benz stejně jako předtím pasivní tlumiče pérování založené na tlaku plynu a spirálové pružiny, které jsou ovšem obzvláště komfortně sladěny.

Aktivní kontrola karosérie se opírá o spolehlivou souhru elektronických, hydraulických a mechanických dílů. Čidla sledují úroveň a zrychlení karosérie, takže mikropočítače mají



Obr.10 ABC systém Mercedes-Benz

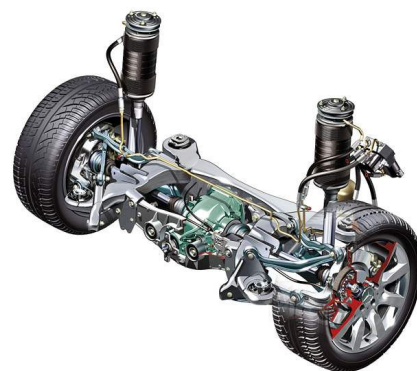
neustále aktuální údaje. Díky nákladné senzorice rozpozná ABC pohyby karosérie již při prvních známkách a koriguje je ve zlomcích vteřiny. To zajišťuje hydraulicky řízený pístový ovládač v pružných vzpěrách. Tyto tzv. plunžrové píсты jsou uspořádány mezi závity péry šroubů a karosérií a pomocí počítače působí přídatnou silou, aby mohly ovlivnit pérování podle pohybu karosérie. To, jak velký musí být tlak na péra a jak dlouho by měl trvat, závisí na úrovni a rychlosti karoserie. Aktivní prvky (plunžrové píсты) nemění charakteristiky tlumení, ale korigují nežádoucí pohyby již odpružené hmoty (karoserie). Tento systém tedy obchází problém proměnné charakteristiky tlumení a je díky tomu přehnaně komplikovaný. Pro dosažení rychlejší odezvy by musel být systém vybaven hydraulikou o ještě vyšších tlacích. Z toho plyne vyšší hmotnost a cenová nedostupnost. Takže pravděpodobně tento systém dosáhl svého maxima již při zrodu.



c)



a)



b)

Obr.11 Části systému ABC Mercedes-Benz

a) přední náprava b) zadní náprava c) řez tlumičem

3.2 Bose suspension

Úplně jinou cestou se vydala firma Bose Corporation. Dle údajů firmy se jim podařilo zkonstruovat tlumicí systém s odezvou 1 ms. Bose v srpnu 2004 prezentoval funkční prototypy automobilů s novým Bose Suspension systémem.

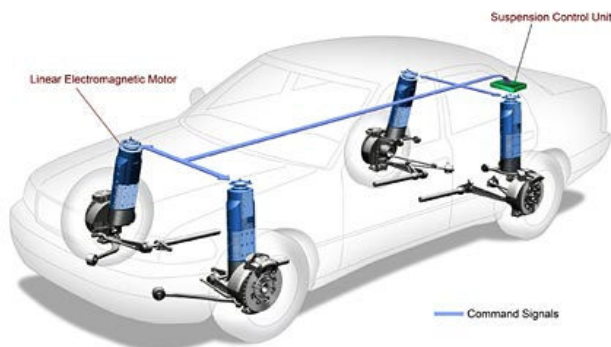


Obr.12 Lineární tlumič Bose

Tento systém je založen na použití lineárních elektromotorů (obr. 12). Ty jsou obsluhovány velmi rychlým zpracováním signálů v řídicí jednotce, která má nelehký úkol: vyřešit prakticky v reálném čase, které z kol právě potřebuje jaké tlumení. Neméně významnou novinkou aktivního podvozku firmy Bose je rekuperace energie v lineárních elektromotorech. Princip činnosti je obdobný jako u elektromobilů, které přeměňují pohybovou energii při brzdění na elektrickou energii, kterou ukládají do trakčních akumulátorů. Lineární elektromotory obdobně při propružení kola generují energii, která se ukládá do vysokovýkonných kondenzátorů Ultra-Caps a jež je později využita k vyvolání vhodného tlumicího účinku. Systém pracuje s napětím 300 V, palubní síť ale zůstává dvanáctivoltová. Rekuperace energie umožnila dosáhnout velmi malého příkonu systému tlumení, který se podle Bose rovná třetině příkonu klimatizace.

Jedná se o principiálně „nejčistší“ způsob tlumení, protože naakumulovaná energie se přemění na elektrickou energii, která se využívá k tlumení.

Možné problémy tohoto odpružení jsou vysoká hmotnost a nákladná řídicí jednotka.



Obr.13 Konstrukční uspořádání Bose tlumičů na vozidle



Obr. 14 Průjezd zatáčkou bez a s BOSE tlumiči

3.3 Upravené konvenční tlumiče

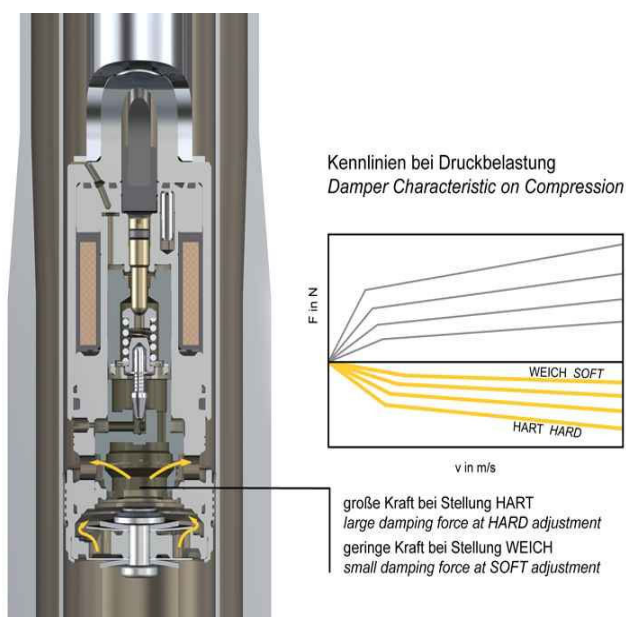
Jinou cestou jdou systémy založené na principu změny tlaku kapaliny konvekčního tlumiče nad a pod pístem. Tedy v horní a dolní komoře tlumiče. Rozdílem tlaků a jejich hodnot lze velice přesně nastavovat charakteristiku tlumení. Rychlost odezvy je asi 10 ms. Tento systém již upravuje problém proměnného tlumení přímo u tlumiče. Ale „zastaralý“ způsob „likvidace“ kinetické energie rázu přeměnou na tepelnou energii zůstává.

Další alternativou hydraulického systému je použití škrťacího ventilu pro přepouštění tlumičové kapaliny z horní a dolní komory. Tento systém je na rozdíl od výše zmíněného limitován rychlostí nastavení škrťacího ventilu.

Výhodou těchto systémů je konstrukční jednoduchost, vycházející ze stávajících sériově používaných tlumičů.

3.3.1 Elektronicky řízené tlumiče CDC (Continuous Damping Control)

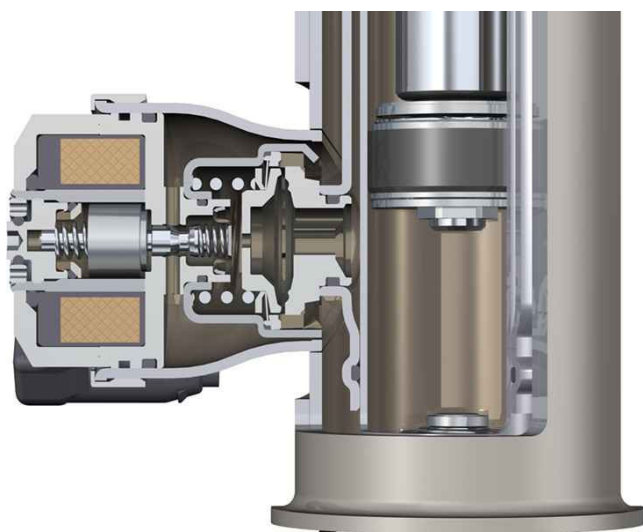
Příkladem je tlumič CDC ZF SACHS. Nejdůležitější částí samotného aktivního tlumiče je řídicí ventil. Elektromagneticky nastavitelný pohyblivý člen uzavírá nebo otevírá průtočné kanály a tím zmenšuje či zvětšuje průtok kapaliny skrz planžety zpětného ventilu. Tlumič je plynule



Obr.15 Řez tlumičem CDCi

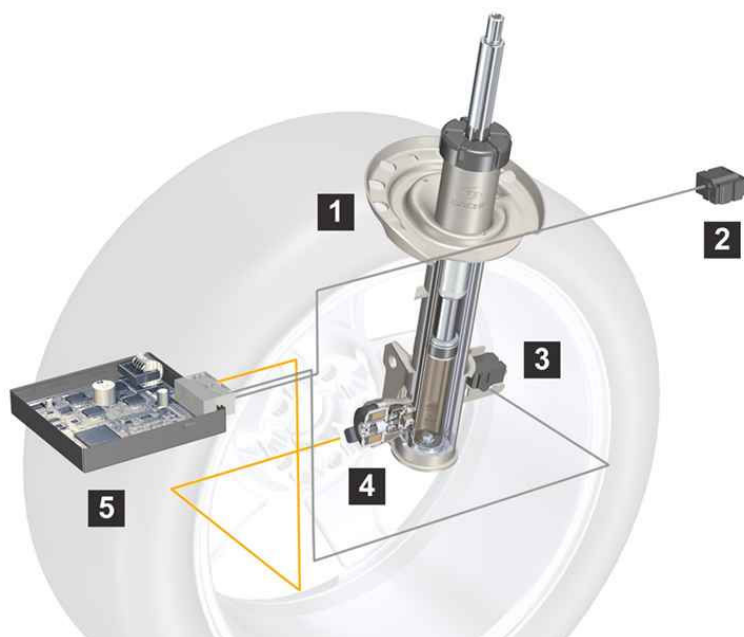
nastavitelný od měkkého naladění až po tvrdou charakteristiku, řídicí jednotka zjišťuje každé 2 milisekundy aktuální potřebu tlumení a následně upravuje až 20x za sekundu proud, který ovládá pohyb pístku. ZF Sachs vyvinul nejprve aktivní tlumič s proporcionálním ventilem zabudovaným do pístu tlumiče. Funkce této verze, označované CDCi (obr. 15) by se dala přirovnat k dvouplášťovému tlumiči s plynule proměnlivými průtočnými ventily.

Prostorově úspornější řešení CDCe (external valve), má proporcionální elektromagnetický ventil mimo těleso tlumiče, v samostatném bypassu (obr. 16). Obě verze vyžadují velmi nízký příkon



Obr.16 Řez tlumičem CDCe

pro ovládání změny průtočných průřezů. Proud se pohybuje v rozmezí 0 až 1,8 A, je-li zařízení v činnosti potřebuje příkon asi 15 W. V případě výpadku palubního napětí, ztrácí systém adaptivní funkci a pružina odsune řídicí ventil do sportovní (tvrdé) polohy, která preferuje bezpečnost před komfortem.



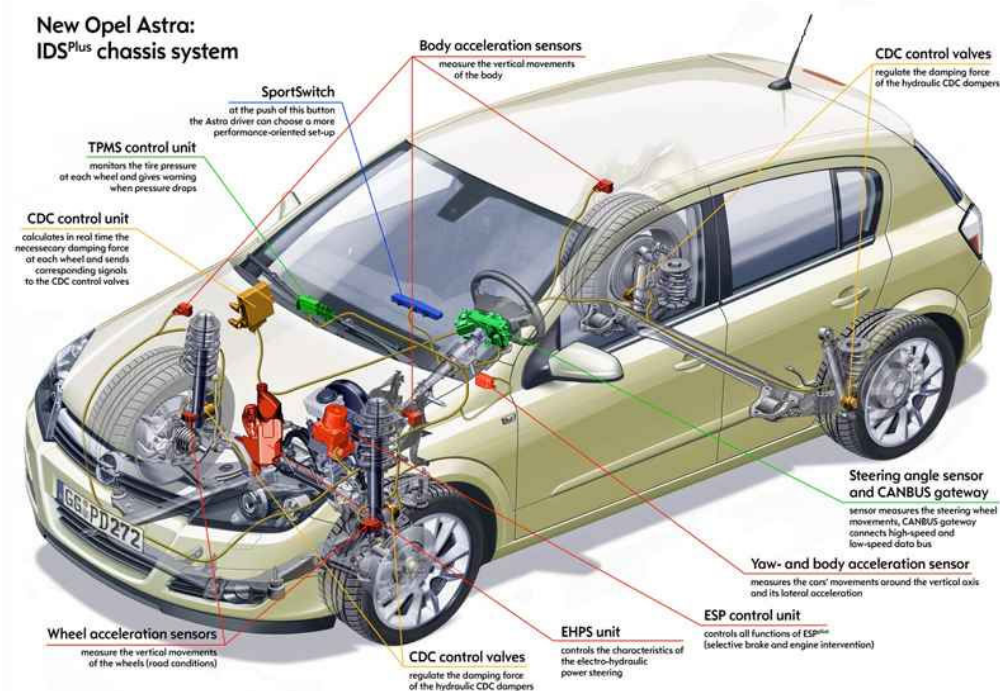
Obr. 17 Zapojení CDC tlumiče

Zapojení CDCe tlumič je vidět na obr.17. Pozicí (2) je označen senzor zrychlení karosérie, pozice (3) označuje senzor zrychlení kola, (4) CDC ventil a pod číslem (5) najdeme elektronickou řídicí jednotku. Informace tří senzorů zrychlení na karosérii (tvoří jednu rovinu, podle které se řídicí jednotka „orientuje“), dvou senzorů zrychlení na kolech vozidla a

dalších signálů (rychlost, poloha pedálu akcelérátoru, boční zrychlení, stáčivá rychlost apod.) slouží jako podklady pro rychlé rozhodování počítače. Ten umí dávkovat tlumící síly samostatně na každé z kol. Tím lze efektivně ovlivňovat chování automobilu v zatáčkách (minimalizace bočních náklonů), ale i při běžném brzdění nebo akceleraci (omezení předklánění/zaklánění).

Elektronická regulace je výhodná také z hlediska propojení s dalšími systémy prostřednictvím sběrnice CAN-BUS, takže pak s aktivními tlumiči spolupracuje ABS, ESP, elektrický posilovač řízení, elektronický pedál plynu nebo řazení automatické převodovky.

Nedávná nezávislá měření dynamiky vozidel Veltheim Rating, která provedl švýcarský časopis *Revue Automobile* potvrdila velmi dobré chování Astry s tlumiči CDC (obr. 18). Test se provádí na 108 metrů dlouhé slalomové dráze s kužely vzdálenými od sebe 18 m. Na této dráze je několik různých povrchů (mokrá, polosuchá, suchá) a úkolem je projet tuto dráhu co nejrychleji. Druhé místo obsadila Astra 1.8 s podvozkem IDS Plus, jež test absolvovala rychlostí 60,9 km/h, průměr všech testovaných aut byl 53,8 km/h. Lepším vozem v tomto specifickém testu bylo Porsche Cayenne, které ale také bylo vybaveno tlumiči CDC



Obr. 18 Kompletní uspořádání CDC tlumiče ve voze Opel Astra

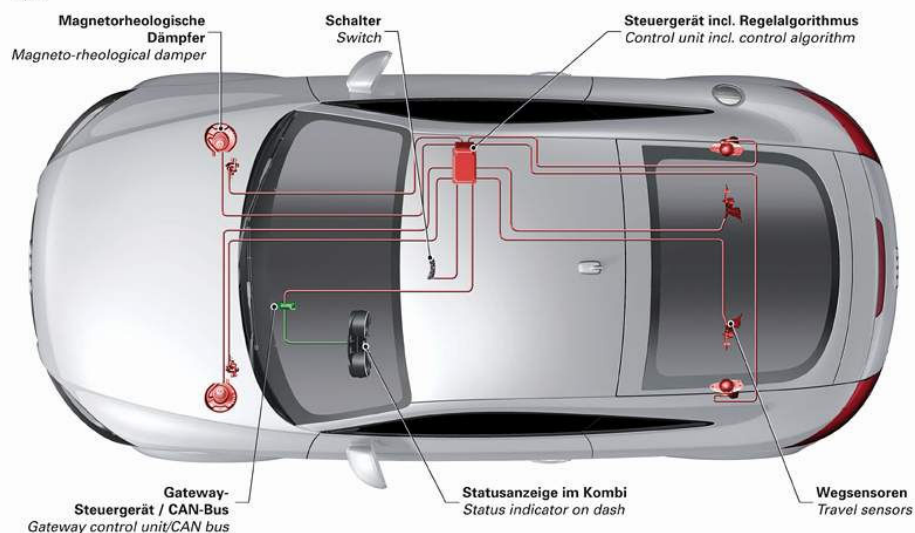
3.3.2 Reologické tlumiče

Dalším typem aktivních podvozků jsou podvozky využívající tlumiče založené na elektoreologickém (ER) a magnetoreologickém (MR) principu. Tyto tlumiče pracují na změně viskozity tlumičového oleje, ke které dochází aplikací elektrického nebo magnetického pole. To umožňuje plynule měnit velikost útlumových sil od měkkého naladění až po tvrdé. Systém je schopen reagovat v řádu milisekund a komunikuje stejně jako CDC pomocí sběrnice CAN-BUS a spolupracuje s ostatními systémy vozidla (obr. 19). Po vyhodnocení všech signálů řídicí jednotka upravuje velikost aplikovaného pole a tím i velikost útlumové síly. Velikost ovládacího proudu je maximálně 2A a je-li zařízení v činnosti potřebuje příkon asi 20 W.

Der neue Audi TT

The new Audi TT
Audi magnetic ride

06/06



Obr. 19 Schéma zapojení MR tlumiče ve voze Audi TT

4 Vlastnosti magnetoreologické kapaliny

I přesto, že ER a MR tlumiče nedosahují tak rychlých odezev jako např. BOSE Suspension nebo závodní hydraulické systémy, měly by nahradit stávající drahé systémy právě díky své technické jednoduchosti, cenové dostupnosti, spolehlivosti a dlouhé životnosti tlumících jednotek.

4.1 ER a MR Kapaliny

Reologie je věda studující deformace a tok materiálu. Reologické kapaliny mají charakteristiky proudění, které mohou být kontrolovaně změněny použitím elektrického proudu a magnetického pole. V závislosti na nosné kapalině a síle elektrického proudu nebo magnetického pole může být změněna viskozita kapaliny od viskozity „thinner-than-water“, po viskozitu téměř tuhého tělesa a na stavy mezi nimi. Odezvy kapaliny jsou okamžité, kompletně reversibilní a extrémně ovladatelné. Přesto ale existují některá omezení.

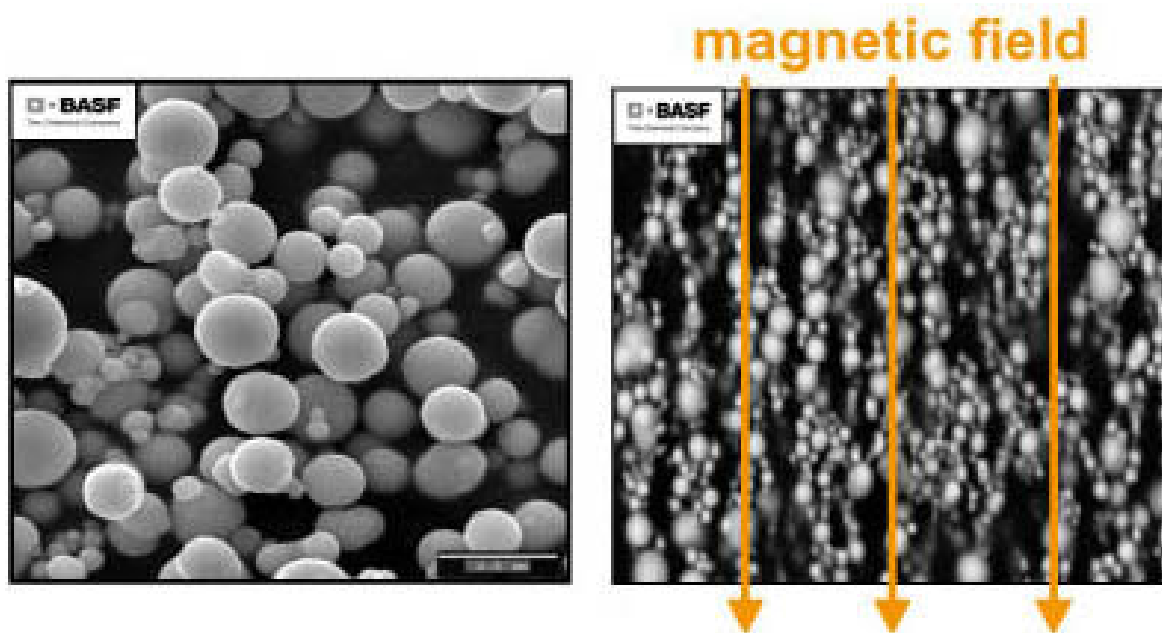
ER kapalina mění svou viskozitu, když je aplikováno elektrické pole přímo do kapaliny. ER kapalina byla vynalezena roku 1940 a vývoj pokračuje dodnes. Byla testována v široké oblasti aplikací přes spojky a tlumiče po syntetické svaly. Kapalina funguje, ale smykové napětí, tedy odpor proti smykovému pohybu je omezený.

MR kapaliny mají smykové napětí asi 10 krát silnější než ER kapaliny. Byly vynalezeny ve stejné době jako ER kapaliny. Mají mnoho společného. Obě mohou používat olej, vodu, silikony nebo glykol jako nosnou tekutinu. Obě obsahují polarizační částičky roztroušené v kapalině. Polarizační schopností částičky se rozumí vlastnost částičky být nuceně zarovnána specifickým způsobem. Tyto roztroušené polarizační částičky jsou hlavním rozdílem mezi ER a MR kapalinami.

4.1.1 MR kapalina

První patent na MR kapalinu byl podán již v roce 1940. Od té doby zůstala MR kapalina spíše laboratorní zvláštností s malým praktickým využitím. Až na přelomu 80. a 90. let začal výzkum směřovat k jejímu praktickému využití. Velký vliv na to měl rozvoj nových technologií. Mikroprocesory, snímací technologie a vzrůstající kapacita elektroniky a procesorová rychlost vytvořily ovládací možnosti, které dříve neexistovaly. Další vliv na rozšíření MR kapaliny mělo vyvinutí těsnění, O-kroužků a dalších komponentů, které odolávají kapalině obsahující železné částičky.

MR kapaliny mají smykové napětí 50-100 kPa při aplikaci magnetického pole o velikosti 150-250 kA/m. Používají částičky železa, které jsou polarizovány obklopujícím magnetickým polem (obr. 20).



Obr. 20 Polarizace částíček magnetickým polem

Typické částice MR kapaliny jsou měkké železné kuličky měřící 2,5-10 μm (obr. 21). V závislosti na aplikaci je kapalina saturována 20 – 40 % železných částic a dalšími aditivy pro zlepšení mísivosti, tření a viskozity kapaliny.



Obr. 21 Porovnání velikosti železných částic s lidským vlasem

MR kapaliny nejsou příliš citlivé na vlhkost nebo jiné škodliviny, které mohou být smíchány během výroby nebo používání. Kromě toho MR kapalinu neovlivňuje ani teplota a proto má stále vlastnosti v širokém teplotním pásmu.

MR kapaliny mohou plnit dvě odlišné funkce – ovládání smykových vlastností a jako ventilový ovládací prvek. Změna smykových vlastností dovoluje v aplikacích kontrolovat relativní pohyb přilehlých součástí, jako jsou spojky a brzdy. V módu ventilového ovládacího prvku se reguluje proudění kapaliny a to zejména v automobilových aplikacích, tlumičích. Poprvé byly MR kapaliny použity v závodních autech, kde cena a trvanlivost nejsou tak kritickými faktory jako v průmyslové automobilové produkci.

MR kapaliny mají mnoho atraktivních rysů, včetně vysokého modulu pružnosti, nízké viskozity, stálého hysterezního chování, které si zachovávají přes širokou škálu teplot. Pro vybuzení magnetického pole lze využít stejnosměrného proudu, který lze rovnou čerpat z elektroinstalace vozu.

Příklady použití MR tlumičů v běžné praxi



Adaptive MRF-dampers for stay cables

Obr. 22 Ukotvení nosných lan



Electronically controllable MR clutch

Obr. 23 Elektronický diferenciál

4.2 Použití magnetoreologické kapaliny v tlumiči

MR tlumiče vycházejí z konstrukce klasických, teleskopických tlumičů. Ty se rozdělují dle konstrukce na:

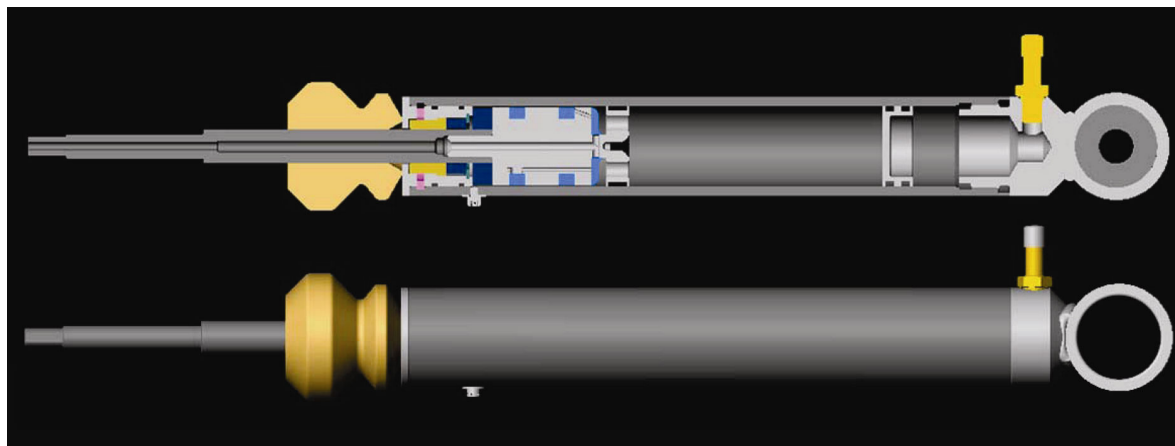
- jednoplášťové
- dvouplášťové.

U konvečních tlumičů je tlumicí síla vyvolána průchodem kapaliny skrz otvory v pístu a planžetami, které zakrývají tyto kanály a jsou odtlačovány kapalinou. Hydraulický odpor, vznikající při tomto škrceném průtoku je příčinou vzniku tlumicí síly závisící na rychlosti pohybu pístu.

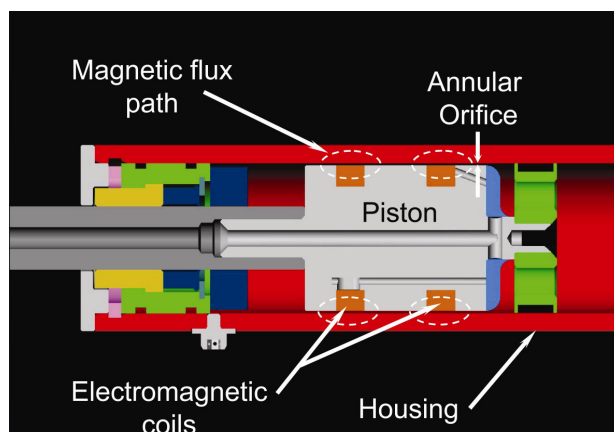
MR tlumiče nepoužívají planžety. Tlumicí síla je vyvolána změnou intenzity magnetického pole pomocí cívky. Ta je napájena pomocí kabelů vedených skrz pístnici.

4.2.1 Jednoplášťový tlumič

Skládá se ze dvou komor navzájem od sebe oddělených plovoucím pístem (obr. 24). V pracovní komoře naplněné hydraulickým olejem se pohybuje píst spojený s pístnicí. V druhé komoře je stačený plyn, většinou dusík, který zabraňuje zpěnění kapaliny při průchodu kapaliny pístem.



Obr.24 Jednoplášťový MR tlumič



Obr.25 Příklad konstrukčního uspořádání jednoplášťového MR tlumiče

U jednoplášťových tlumičů je cívka vždy umístěna v pracovním válci. Může být umístěna přímo na pístnici nebo jako součást pístu (obr. 25). Častěji používaná řešení jsou s cívkou umístěnou na pístu. Cívka může být navinuta po vnějším obvodu pístu nebo umístěna do těla pístu. Konstrukce je bez použití elektromechanických ventilů nebo jakýchkoliv malých pohyblivých dílů. Když je aplikováno magnetické pole, kovové částičky obsažené v MR kapalině vytvářejí hustou síť řetězců a tím dochází k nárůstu tlumicí síly při nárazu. Po ukončení aplikace magnetického pole se částičky vrátí do své přirozené polohy dovolujíc volný pohyb tlumiče a tím se sníží i tlumicí účinek.

4.2.2 Dvoupplášťový tlumič

Dvoupplášťový tlumič se skládá z vnějšího a vnitřního (pracovního) válce. V pracovním válci vyplněném kapalinou se pohybuje píst. Mezi pracovním a vnějším válcem je tzv. vyrovnávací prostor, naplněný přibližně do třetiny kapalinou. Oba prostory jsou propojeny vyrovnávacím ventilem ve spodní části tlumiče. Vyrovnávací prostor slouží k vyrovnávání rozdílů skutečného objemu pracovního prostoru, který se při zasouvání pístnice postupně zmenšuje o její objem a na vyrovnání rozdílů objemu tlumičové kapaliny, který je závislý na její teplotě. Horní konec pracovního a vyrovnávacího prostoru je uzavřen víkem, ve kterém je pouzdro a těsnění pístnice. U těchto typů tlumičů je možno umístit vinutí cívky vně na pracovní válec. Toto řešení je však nevýhodné z důvodu magnetizování velkého objemu a tím i použití vyšší intenzity magnetického pole a proto se používají varianty s cívkou umístěnou na pístu.

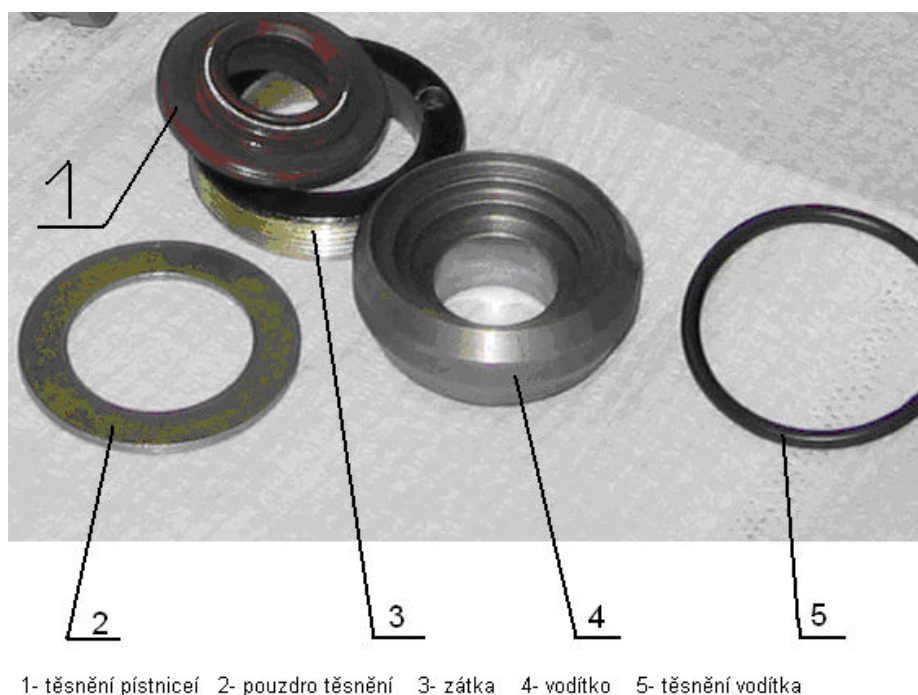
5 Základní konstrukční díly magnetoreologického tlumiče

Jako východisko pro mnou navrhovaný MR tlumič mi bylo doporučeno zvolit z výrobního programu firmy BRANO a.s. typovou řadu 27. Tzn. průměr pístu tlumiče je 27 mm. Tato řada byla používána pro osobní vozy Škoda. Průměr pístnice byl zvolen větší, než byl používán u této typové řady v sériové výrobě, z důvodu nutnosti vyvrtání dutiny pro vedení zdroje proudu.

Snahou bylo využít pro konstrukci co nejvíce komponentů používaných v sériové výrobě. To se týkalo zejména vnějšího a pracovního válce, sacího ventilu a systém uzávěru tlumiče.

5.1 Uzávěr tlumiče

Uzávěr tlumiče plní několik funkcí: utěšňuje tlumič proti okolnímu prostředí, odděluje vnější a pracovní válec, vede pístnice, tvoří klíčový uzel tlumiče při namáhání na roztržení. Systém tvoří 5 součástí (obr. 26): vodítko, těsnění pístnice, těsnění vodítka, pouzdro těsnění a zátka.



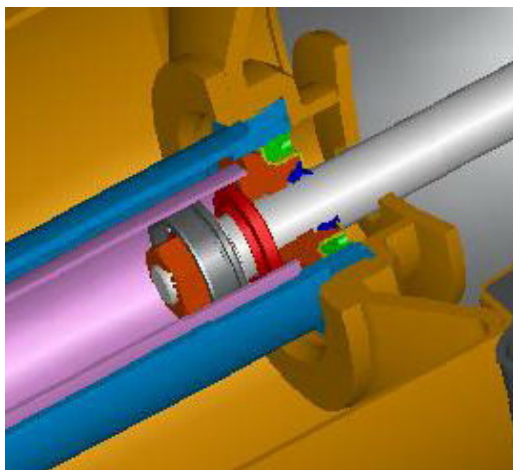
Obr.26 Uzávěr tlumiče

Do vodítka je nalisováno pouzdro pístnice pro zlepšení kluzných vlastností a trvanlivosti uložení pístnice ve vodítku. Vodítko s pouzdem je nasazeno na pístnici a pracovní válec. Na něj jsou

nasazena obě těsnění. Ta jsou poté přikryta pouzdem těsnění, které tak společně s vodítkem svírá těsnění pístnice i vodítka. Celý systém je uzavřen zátkou se závitem.

5.2 Doraz tlumiče

Pro tlumič lze použít dva druhy dorazu: hydraulický nebo mechanický. Pro svou konstrukci jsem použili jednoduchý mechanický doraz (obr. 27). Mechanický doraz slouží k zachycení hmotnosti neodpružených hmot při statickém vyvážení nápravy.



Obr. 27 Mechanický doraz tlumiče

5.3 Sací ventil

Slouží k přepouštění přebytečné kapaliny, která je při stlačování tlumiče vytlačena zasouvající se pístnicí, do vyrovnávacího prostoru; při roztahování proudí nazpět do pracovního prostoru (obr.28).



Obr.28 Sací ventil

5.4 Gumokovová podložka na tlumení chvění

Je pryžový díl (obr. 29), který mírní rázy vzniklé provozem vozidla a umožňuje natáčení tlumiče v bodech uchycení od základní montážní polohy. Tento otočný pohyb je důsledkem geometrických poměrů v nápravě. Pryžový díl je dále schopen pohlcovat vibrace vysokých frekvencí.



Obr. 29 Spodní pryžové uložení tlumiče závodního vozu Tatra

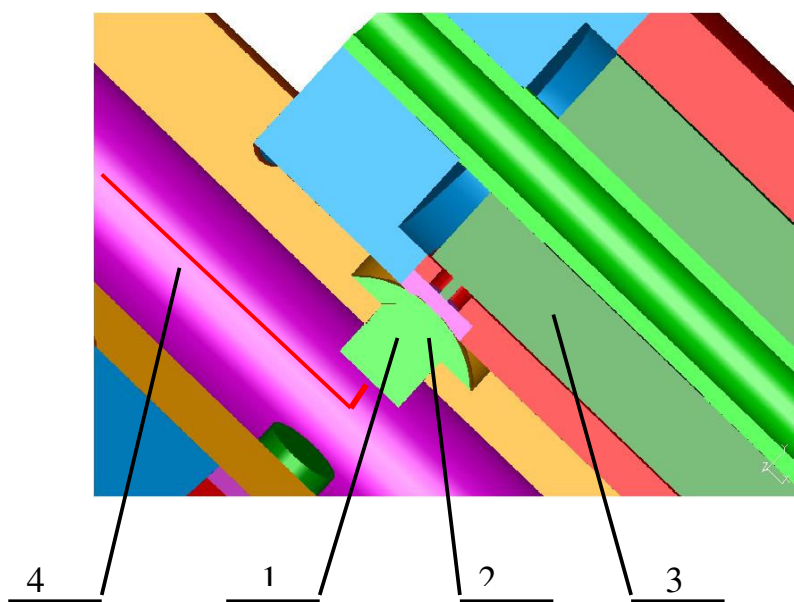
6 Návrh cívky

Při návrhu cívky jsem vycházel ze základních empirických vztahů pro výpočet magnetického pole. Magnetické pole válcové cívky tvoří soustava sériově spojených závitů. Budou-li tyto závity hustě vinuty, můžeme předpokládat, že místo vinutí ve tvaru šroubovice je solenoid složen z jednotlivých N kruhových smyček stejného poloměru R , přičemž každou protéká stejný proud I .

6.1 Zapojení cívek

Při konstrukci jsem byl omezen průměrem pístu. Proto bylo nutné rozdělit cívku na dvě menší, paralelně zapojené. Toto zapojení jsem volil z důvodu snadnější konstrukce. Přívod ovládacího proud je skrz dutinu v pístnici. K cívkám je přiveden pouze kladný pól, jako zem slouží pístnice. Problém bylo vyřešit přechod proudu z pístnice do pístu, kde je cívka umístěna, bez nutnosti přesného vymezení polohy pístu k pístnici. Proto jsem volil kombinaci elektrických nýtů s čočkovou hlavou a sběrných kroužků, které jsou schopny přenášet elektrický proud po celém obvodu (obr. 30).

Elektrický nýt je umístěn v osazení pro píst na pístnici. Sběrný kroužek je vsazen do osazení v pístu. Styčné plochy kontaktů jsou pozlaceny z důvodu snížení přechodového odporu a zbytek povrchu tělesa je odizolován.



Obr. 30 Mnou navrhované napájení cívky
1) kontaktní nýt 2) sběrný kroužek 3) cívka 4) přívodní drát

6.2 Předběžný výpočet cívky

Vstupní parametry pro výpočet

Napětí zdroje 12V

Ovládací proud 1,8A – proud, při kterém kapalina dosahuje maximální tlumicí síly, dáno výrobcem

Výpočet jedné cívky:

Výpočet odporu:

$$U = R * I \Rightarrow R = \frac{U}{I} = \frac{12}{0,9} = 13,3 \quad [\Omega]$$

Příkon cívky

$$P = R * I^2 = \frac{U}{I} * I^2 = U * I = 12 * 0,9 = 10,8 \quad [\text{W}]$$

Výpočet délky cívky

$$R = \rho * \frac{l_z}{S} \Rightarrow l = \frac{R * S}{\rho} = 0,015 \quad [\text{m}]$$

Určení počtu závitů

$$R = N^2 * \rho * \frac{l_z}{S} \Rightarrow N = \sqrt{\frac{R * S}{\rho * l_z}} = 300 \quad [-]$$

Prostupem elektrického proudu dochází k ohřívání vlastní cívky a tím i ke změně velikosti proudu a i ostatních vlastností. Dále je cívka ohřívána vlastní prací tlumiče z důvodu maření energie. Tím dochází k nelineárním změnám vlastností cívky. Postihnout výpočtem tyto jevy je složité a z praktického hlediska je lepší je podložit vlastním měřením.

7 Návrh pístu

U pístu pro MR kapalinu odpadá systém planžet, kterými je u konvenčních teleskopických tlumičů řešeno tlumení. Veškeré změny charakteristiky tlumení se odehrávají pouze změnou viskozity kapaliny. Hlavními požadavky na píst bylo vhodné umístění cívky a zajištění určité tlumicí síly, při případné poruše v magnetickém obvodu. Tento požadavek je z důvodu zachování dostatečného tlumicího účinku pro bezpečné dojetí vozidla do servisu.

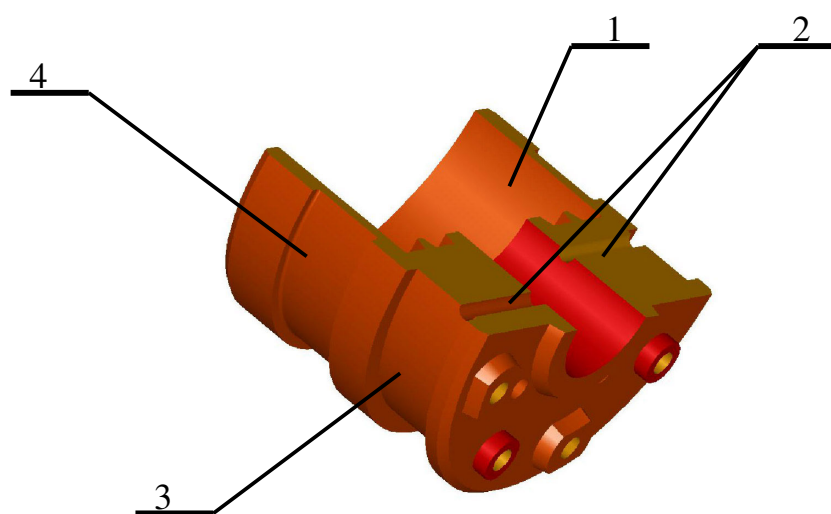
Při konstrukci jsem byl limitován pouze průměrem pístu. To mělo vliv při výběru vhodné varianty umístění cívky a kanálů. Výběr jsem zužil na dvě varianty:

- cívka navinuta na vnější průměr pístu
- cívka vložená do těla pístu.

7.1 Tělo pístu

7.1.1 Píst s cívkou vně

Původní konstrukce směřovala k variantě s cívkou na těle pístu. U toho řešení byl píst jednodílný (obr. 31). Nevýhodou a důvodem, proč jsem od této varianty upustil, byl přímý kontakt cívky s kapalinou a během životnosti zde hrozilo nebezpečí zkratu na cívce, vlivem přímého tepelného namáhání a oděru izolace drátu.



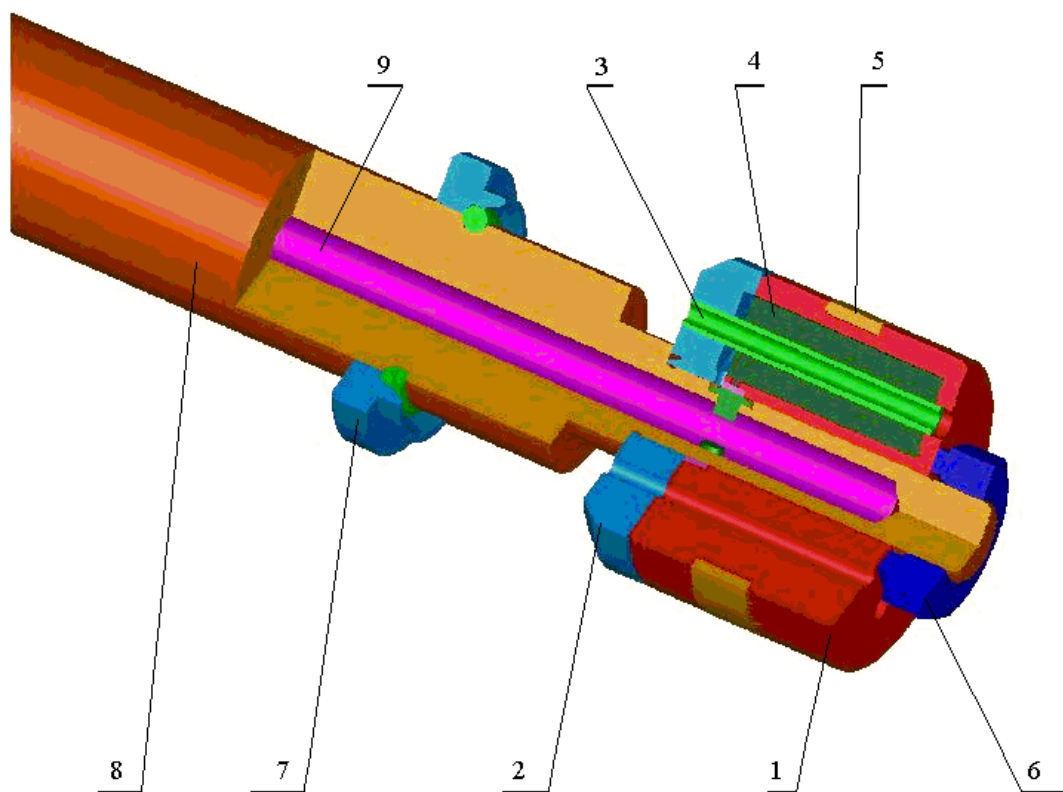
Obr.31 Vlastní návrh pístu s cívkou vně v řezu

1) tělo pístu 2) kanál pro drát cívky 3) prostor pro cívku 4) prostor pro pásek

7.1.2 Píst s vloženou cívkou

U této varianty je píst dělený (obr. 32). Skládá se celkem ze tří částí:

- víko (obr. 35)
- jádro (obr. 36)
- píst (obr. 33)



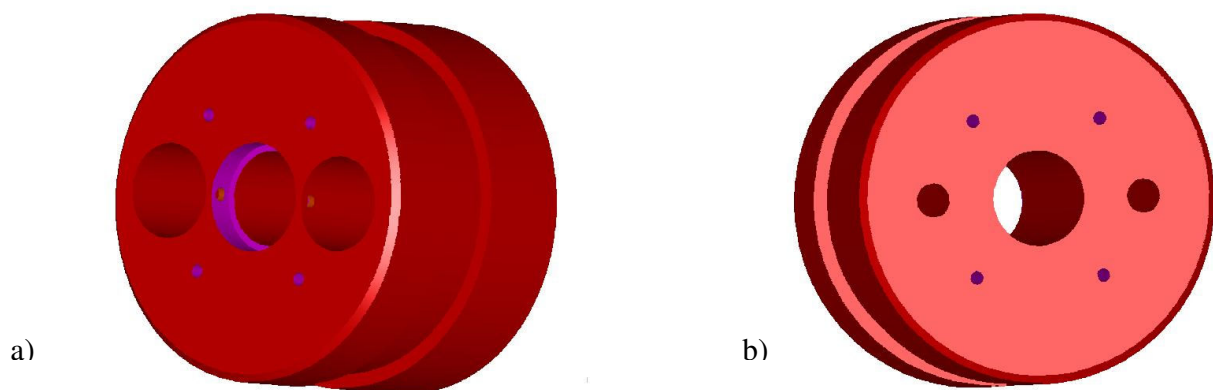
Obr.32 řez tlumičem

1) píst 2) víko 3) jádro 4) cívka 5) pásek 6) matice 7) doraz 8) pístnice 9) dutina

Pro tento typ konstrukce jsem se rozhodl z několika důvodů. Snažil jsem se o co nejjednodušší konstrukci, která by byla i při pozdější repasi snadno demontovatelná a bylo možné vyměnit pouze vadný díl.

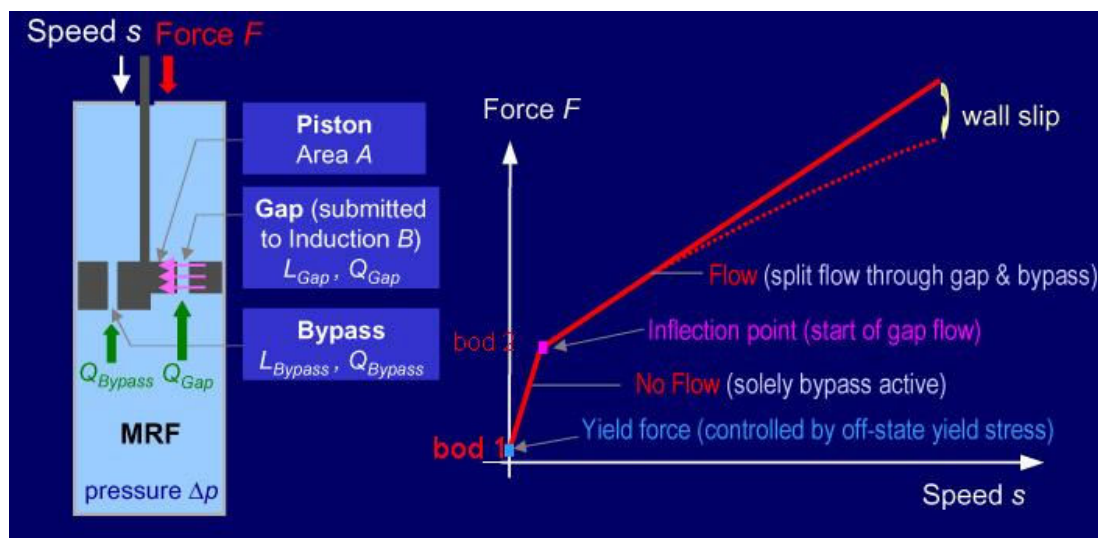
Výhodou tohoto řešení je vložení již namotané cívky na plastové kostře. Tím, že je cívka vložena do těla pístu, je zde nižší riziko vzniku zkratu vlivem poškození izolace drátu cívky oproti konstrukci s cívkou vně. Další výhodou je umístění cívky na kanálu, čímž je zajištěno homogenní magnetické pole při průchodu kapaliny.

Dalším krokem při konstrukci pístu byla volba vhodného materiálu. Hlavním kritériem pro volbu materiálu byly odpovídající magnetické vlastnosti. Musí mít malou hysterezi. Tuto vlastnost mají magneticky měkké materiály, mezi které patří oceli s nízkým obsahem Uhlíku. Zvolil jsem materiál 11 523. Tato ocel by měla díky svým vlastnostem uzavírat magnetické pole v blízkém okolí cívky a tím by nemělo docházet k vyzařování mimo tlumič. Dalším důvodem byla i dobrá obrobitelnost. Limitním faktorem feromagnetických látek je teplota, při které feromagnetismus skokem zmizí. Tato teplota je pro každé feromagnetikum odlišná a nazývá se Curieova teplota. Pro železné látky je hodnota této teploty 770°C , což je vysoko nad teplotami vyskytujícími se v tlumiči. Hodnota bodu vzplanutí MR kapaliny je 160°C .



obr.33 Píst s cívkou vně
a) pohled na horní plochu b) dno pístu

V pístu jsou kromě kanálů v jádru ještě menší kanálky, tzv. bypassy (obr. 32), které slouží pro vytvoření tlumicí síly při nízkém zdvihu a rychlosti pístu. Na obr. 33 je znázorněn průběh tečení MR kapaliny skrz píst. V bodě 1 dochází k překonání vnitřního napětí kapaliny a kapalina začíná tec. V této fázi kapalina proudí skrz bypassy a vzniklý hydraulický odpor vytváří tlumicí sílu až do bodu 2. V této chvíli dochází k aktivaci magnetického pole a kapalina proudí jádrem.

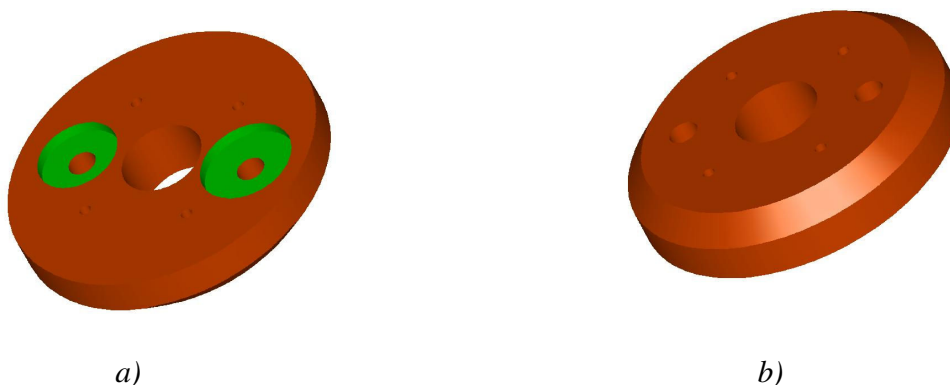


Obr. 34 Závislost rychlosti pístu na tlumící síle

Optimální průměr kanálů v jádře a baypassů je složité matematicky popsat. Projevuje se vliv dynamické viskozity, která se neustále mění vlivem měnící se intenzity magnetického pole a změnami teplot. Vhodné průměry budou předmětem testování. Mnou navrhované průměry jsou předběžné a vycházejí z porovnání s průměrem kanálů v sériově vyráběných tlumičích plněné hydraulickým olejem.

7.2 Víko

Plní dvě funkce. Kryje cívku, zabraňuje jí v pohybu a zároveň slouží jako nosič jádra (obr. 35). Materiál je stejný jako pro píst.



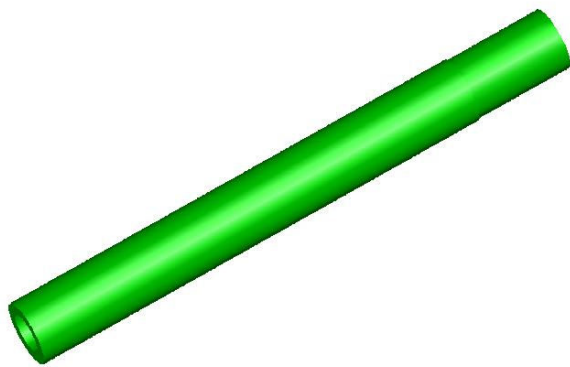
obr. 35 Víko

a) spodní pohled b) pohled z vrchu

7.3 Jádno

K optimalizaci magnetických vlastností cívky se dovnitř vkládá jádro. Vhodnou volbou materiálu je možné ovlivnit magnetické pole. U mnou navrhované konstrukce plní jádro zároveň i funkci kanálu (obr. 36), kterým protéká MR kapalina. V tomto kanálu dochází ke zmagnetizování kapaliny a tím ke změně viskozity. Je třeba volit takový materiál, který zvýší intenzitu magnetického pole vyvolaného cívkou ve středu kanálu. Jak jsem si ověřil na zkušebním tlumiči, při použití magneticky měkkého materiálu nedochází k zesílení intenzity magnetického pole ve středu jádra, nýbrž na vnějším průměru. To je způsobeno soustředěním magnetických vln mimo kanál, a tím i minimální změnu viskozity kapaliny.

Vhodným kandidátem, který splňuje již zmíněné požadavky, je neželezný materiál. Hliník a jeho slitiny jsou velmi dobrý vodič elektrického proudu, široce používaný v elektrotechnice a ve formě slitin v leteckém průmyslu a mnoha dalších aplikacích. Proto jsem volil materiál jádra slitinu hliníku ČSN 42 4201.



Obr.36 Jádno s kanálem

7.4 Zjednodušený výpočet tlumiče

Při konstrukci tlumiče by tlak uvnitř, při maximální pístové rychlosti, neměl překročit hodnotu 8,5MPa (platí pro tlumičový hydraulický minerální olej).

Vstupním parametrem pro konstrukci MR tlumiče byla hodnota maximální tlumicí síly. Ta byla stanovena na 1800N. Tento útlum je pro použití jako automobilový tlumič dostačující.

Maximální přípustná tlumicí síla:

$$F = p * S = p * \frac{\pi * (D_p^2 - D_r^2)}{4} = 8,5 * \frac{3,14(27^2 - 16^2)}{4} = 3157 \quad [\text{N}]$$

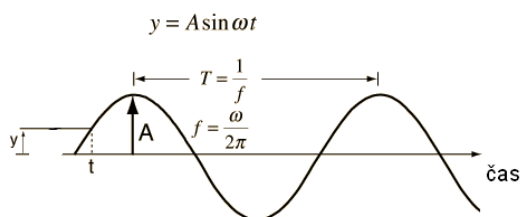
Maximální tlakový spád na píst při síle 1800N:

$$F = \Delta p * \pi * \frac{(D_p^2 - D_r^2)}{4} \Rightarrow \Delta p = \frac{4 * F}{\pi * (D_p^2 - D_r^2)} = \frac{1800}{371} = 4,85 \quad [\text{MPa}]$$

8 Měření

8.1 Charakteristiky tlumičů

Kontrola útlumových sil tlumiče je prováděna na zkušebních mechanických nebo hydraulických stavech. Zkušební cyklus má sinusový průběh (obr. 37).



Obr. 37: Princip harmonického pohybu

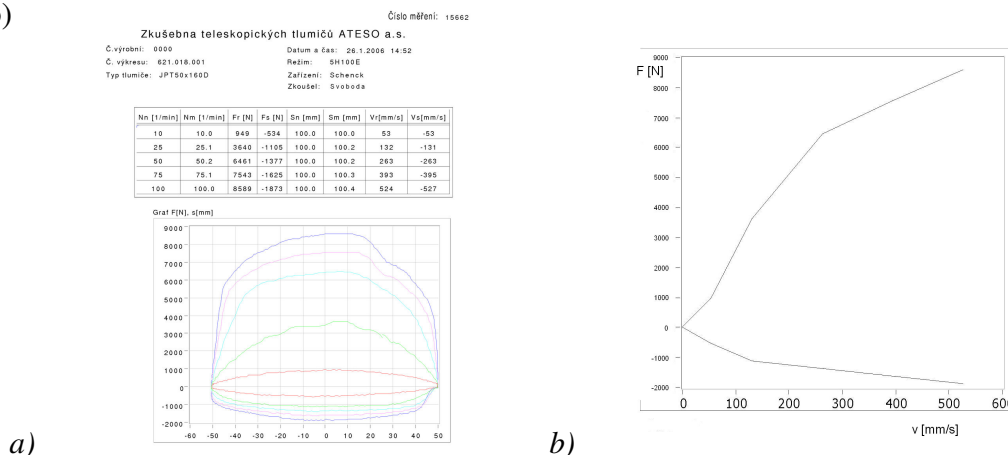
popsaného rovnicí:

$$y = A_t \cdot \sin \omega t \quad [\text{m}]$$

$$v = \omega \cdot A_t \cdot \cos \omega t \quad [\text{m/s}]$$

přičemž zdvih s tlumiče ve zkušebním stavu, neboli amplituda kmitavého pohybu $A_t = s/2 = 50 \text{ mm}$.

Ze těchto vztahů lze potom přepočítat vztah mezi otáčkami a obvodovou rychlostí. Tlumiče se zpravidla zkouší v několika rychlostních úrovních. Výsledkem je tzv. F-s diagram, neboli závislost útlumové síly na zdvihu. Graf průběhu útlumových sil při testu v pěti úrovních otáček je na obrázku č. 38a. V něm lze odhalit některé výrobní vady a nedostatky tlumičů. Z hodnot rychlostí v bodě $s=0$ se poté vytvoří tzv. F-v diagram, neboli rychlostní charakteristika tlumiče (obr. 38b)



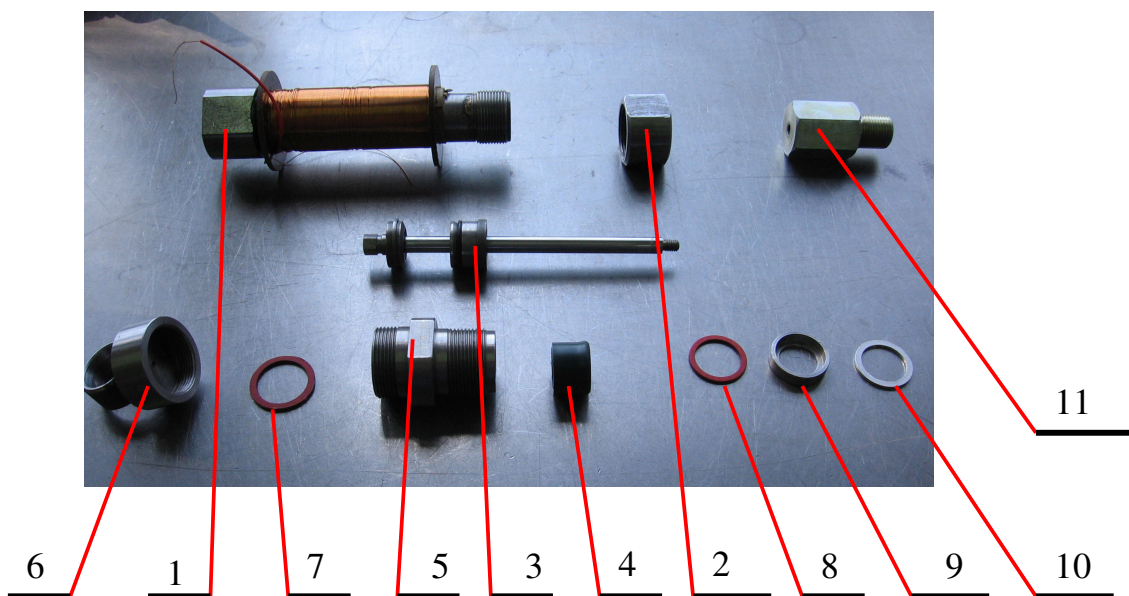
Obr. 38: Charakteristiky tlumičů

a) závislost síly na zdvihu tlumiče v různých úrovních rychlosti, b) rychlostní charakteristika

8.2 Vlastní měření

V době odevzdání diplomové práce byl mnou navržený tlumič teprve ve výrobě, proto nebylo možné provést měření a ověřit správnost výpočtů. Proto jsem pro měření využil náhradního řešení. Použil jsem starší zkušební jednoplášťový tlumič (obr. 39), průměr 25 mm, který byl pro experimentální měření vhodný.

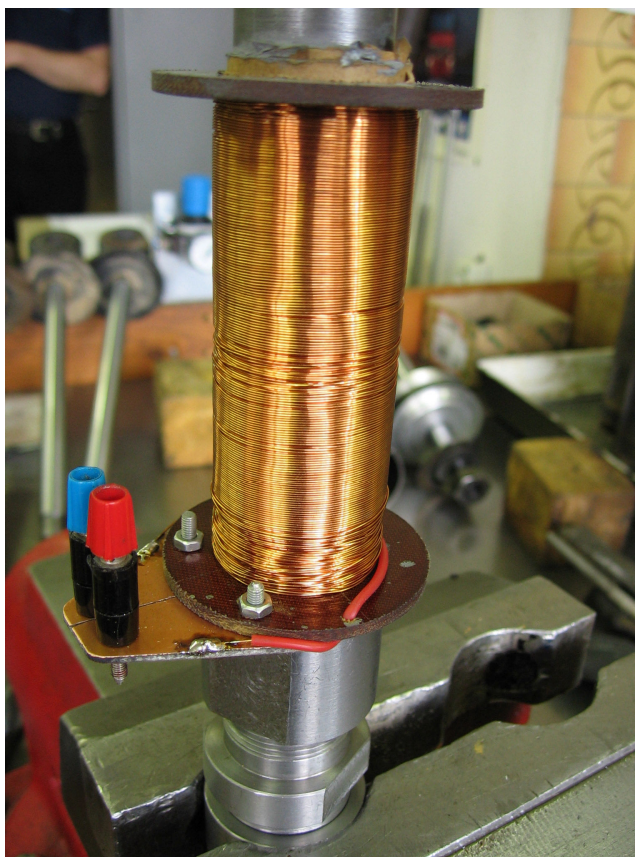
Tlumič se skládá celkem z 10 dílů, z pracovního válce, naplněného MR kapalinou. V něm se pohybuje píst s pístnicí. Pístnice je vedena vodítkem, ve kterém se nachází těsnění. To je z vrchu kryto uzávěrem. Ke spodní části pracovního je připojen pracovní válec plovoucího pístu, který je uzavřen dnem.



Obr.39 Zkušební jednoplášťový tlumič

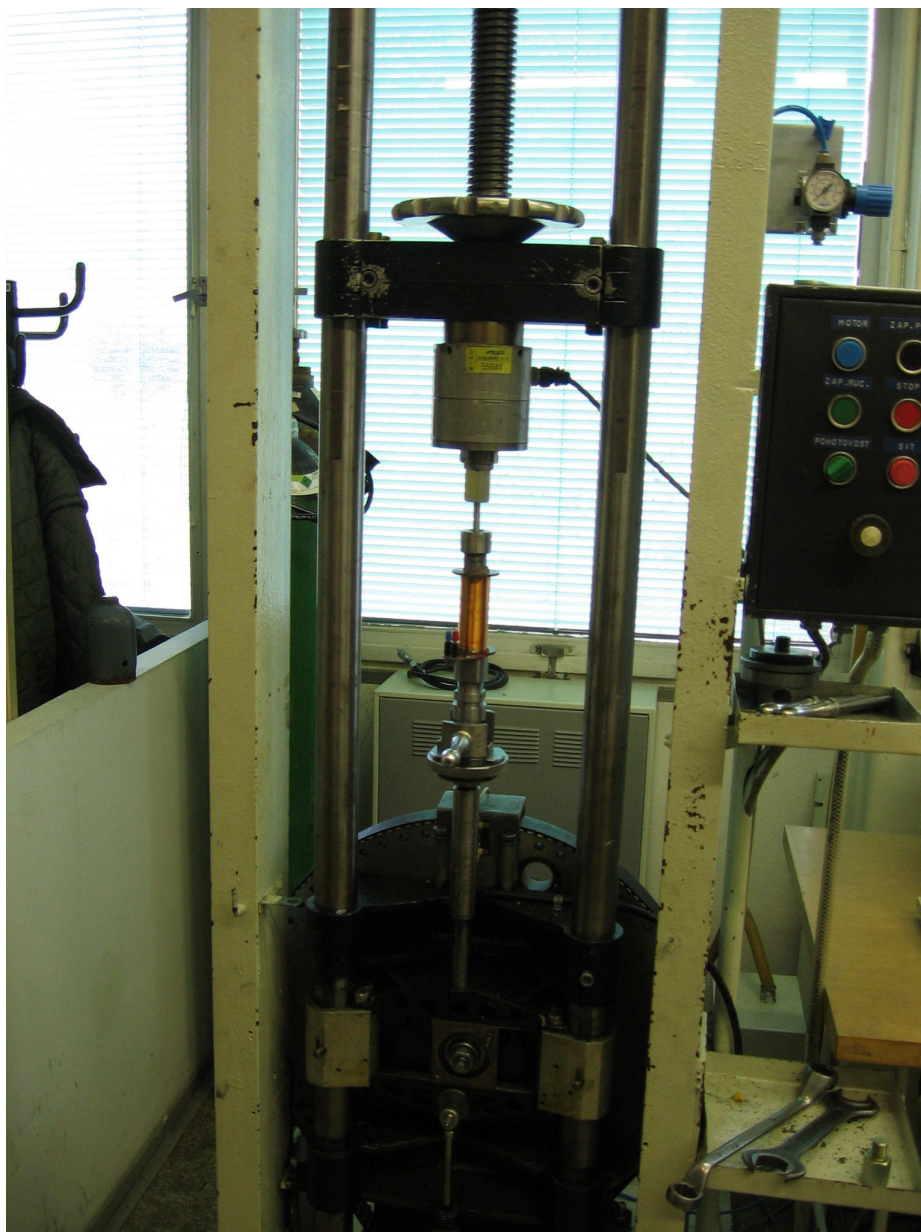
- 1) Válec s cívko 2) zátka 3) sestava píst-pístnice-vodítko 4) plovoucí píst 5) válec plovoucího pístu 6) dno 7) těsnění dno-válec 8) těsnění válec 1 – válec 5 9) redukce 10) podložka 11) příruba pro uchycení tlumiče do zkušebního stavu.

Jelikož se jedná o jednoblašťový tlumič, využil jsem možnosti navinout cívku na tělo válce (obr.40). Tím mělo dojít k magnetizování celého objemu MR kapaliny a vlivem změny viskozity i ke změně tlumicí síly.



Obr.40 Cívka

Pro měření jsem použil klikový zkušební stav (obr. 41), vybavený silovým snímačem. Pro ověření funkčnosti cívky, jsem prováděl měření v několika rychlostních režimech, vždy za předem stanovené velikosti proudu. Výsledky měření byly uloženy v měřicím programu ŘÍZENÍ, který umožňuje ukládání jednotlivých měření a následné vložení výsledků do jednoho grafu, pro porovnání výsledků měření.

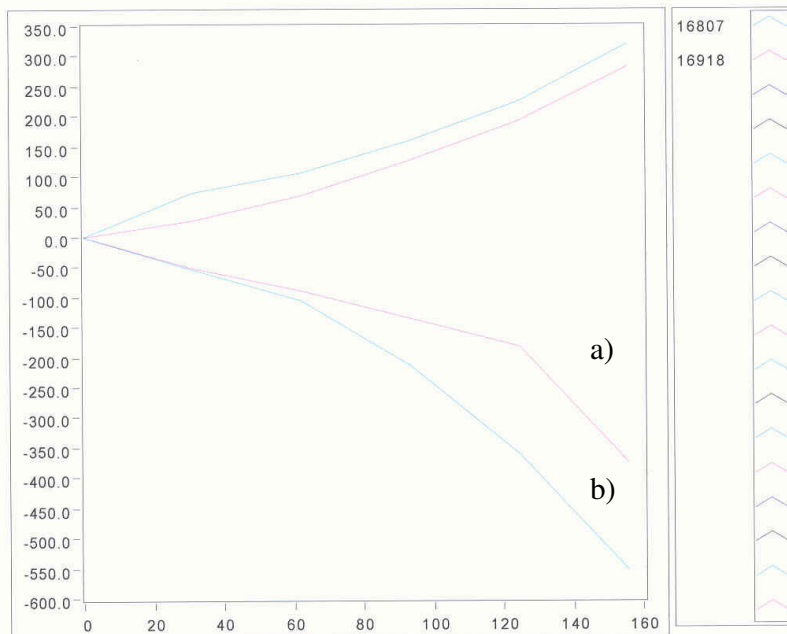


Obr.41 Mechanický klikový stav

Měření přineslo očekávaný výsledek. Změna velikosti tlumicí síly při průchodu magnetického pole byla nižší, než se předpokládalo. Domnívám se, že výsledek byl ovlivněn materiálem válce, na kterém byla cívka navinuta. Materiál válce byla ocel tř. 11. Tato ocel je schopna zesilovat magnetické pole pouze za předpokladu, je-li jádro, válec, z plného materiálu. V mém případě docházelo k uzavírání magnetického pole mimo válec. Výsledek měření mě utvrdil v předpokladech o magnetických vlastnostech materiálu.

Zkušebna teleskopických tlumičů ATESO a.s.

Datum a čas tisku: 24.5.2007 9:38



Poznámka:

Obr.43 Rychlostní charakteristika
a) bez magnetického pole b) s aplikací magnetického pole

9 Závěr

Provedené experimentální měření prokázalo závislost intenzity magnetického pole na vhodně zvoleném materiálu konstrukčních prvků tlumiče a tím i přímou souvislost s velikostí tlumící síly.

Po vyrobení navrženého tlumiče bude možno zahájit zkušební měření, které ukáže skutečné vlastnosti navržené konstrukce a bude podkladem pro optimalizaci konstrukčního řešení (jedná se zejména o stanovení správného průměru kanálů v pístu a konstrukci cívky). Předpokládám, že z naměřených hodnot bude možno stanovit i přesnější matematický model pro požadovanou cívku vzhledem k tomu, že se získají konkrétnější informace o vlastnostech MR kapaliny. Tím by bylo možno stanovit velikost ovládaného proudu pro předem definovanou velikost tlumící síly. Tohoto je možno využít pro návrh tlumiče s předem naprogramovanými jízdními stavy (např. komfort, sport), kde by ovládání bylo prováděno manuálně nebo automaticky. Výhodou by byla možnost při minimálních změnách v konstrukci vozu náhrada konstrukčně složitých systémů jednodušší konstrukcí zabezpečující stejné funkce.

Další hodnotou, kterou by bylo účelné sledovat, je doba odezvy viskozity kapaliny na změnu intenzity magnetického pole. Tato informace bude ovlivňovat směr uplatnění navrženého MR tlumiče v praxi. To je, zda bude vhodný pouze pro uplatnění pro předem naprogramované stavy nebo zda rychlost reakce bude dostatečně rychlá pro použití jako aktivní člen, který by přímo reagoval na změny jízdních stavů.

Použitá literatura

- [1] Vlk, F.: Podvozky motorových vozidel, nakladatelství VLK 2000
- [2] Gscheidle, R. a kolektiv: Příručka pro automechaniky, Sobotáles 2001
- [3] Zajíc, J.: Fyzika II(Elektřina a magnetismus), Univerzita Pardubice, 2004
- [4] Štoll, I.: Elektřina a magnetismus, ČVUT, 1994
- [5] Dvořáček, J. a kolektiv: Kurs radiotechniky, SNTL 1975
- [6] <http://www.auto.cz>
- [7] <http://www.lord.com>
- [8] <http://www.bose.com>
- [9] www.motorhome.cz
- [10] interní materiály firmy BASF-The Chemical Company, Germany
- [11] www.tatra.cz
- [12] www.intest.cz
- [13] <http://cs.wikipedia.org>